

複合トラス橋の圧縮斜材定着部に関する一考察

オリエンタル建設(株) 本社 正会員 ○正司 明夫
 オリエンタル建設(株) 本社 正会員 辻村 隆
 大阪工業大学 八幡工学実験場 園田 恵一郎

1. はじめに

鋼管を斜材とし、上・下床版をコンクリートとした複合トラス橋の設計において、重要となる課題の一つに格点部の設計法がある。現在、わが国において、この部位に関して詳細な設計法を記述した規準はない。最近の研究において種々の格点構造が提案されている^{1) 2) 3)}が、いずれも格点部の実験的研究によるものである。本研究においては、種々提案されている格点構造のうち、圧縮斜材定着部に着目し、フランジを介して定着する方法を用いた構造（以降、フランジタイプと呼ぶ）と引張軸力と圧縮軸力を伝達するための鋼製のせん断キー等が取り付けられた鋼管をコンクリート床版内へ埋め込んだ構造（以降、埋込みタイプと呼ぶ）に関して圧縮斜材定着部の応力性状を解析的に検討するものである。

2. 検討モデル

鋼管および斜材定着部の部材寸法を決定するために、図-1に示すような中央支間長 99mを有する3径間連続ラーメン橋を検討モデルとした。複合トラス橋における圧縮斜材定着点において照査する重要な事項の1つとして、コンクリートとの格点部において発生する圧縮応力がある。これは、鋼製の斜材より、コンクリート格点部に高い圧縮応力が作用するためである。例えば、フランスのプローネ橋では、 50N/mm^2 のコンクリートが使用され、この制限値を結果として高めている⁴⁾。現行の道路橋示方書においては、設計基準強度 40N/mm^2 のコンクリートを使用する場合、許容曲げ圧縮応力度は 14N/mm^2 （長方形断面以外）となっており、図-1に示す橋梁において、この制限値を満足させるためには、応力で決定される鋼管径より径を大きくするケースもでてくる。しかし、鋼管径を大きくする場合、当然のことながら鋼管と接合部の拘束度が高くなるため、図-2に示すように発生曲げモーメントが鋼管径にほぼ比例して大きくなる。したがって、鋼管径が大きくなり、景観上好ましくないものになる可能性がある。また、この格点部に発生する断面力を軽減させるために、外ケーブルを斜めに配置することによりプレストレスの鉛直分力成分を有効に利用することが考えられるが、配置上、制限を受ける場合がある。

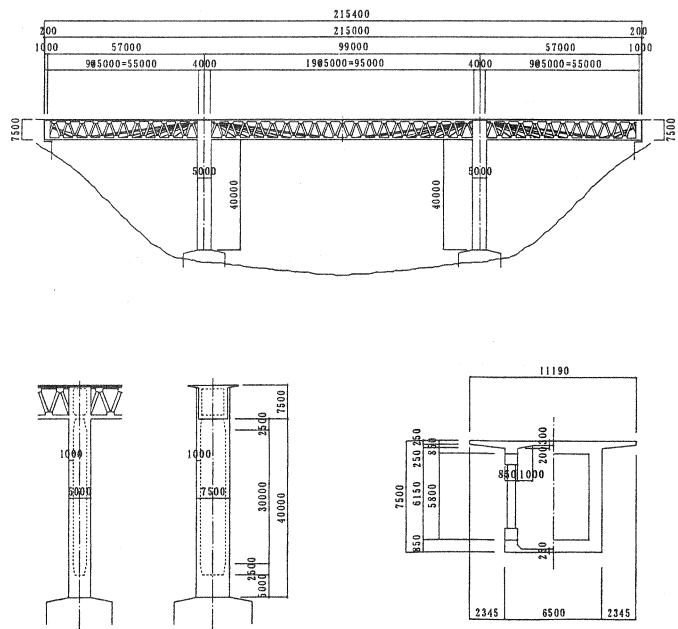


図-1 検討対象橋梁

また、圧縮斜材定着点における別の検討課題として、斜材定着点における鋼管取り付け部付近の応力集中がある。これは、定着点付近の構造によって応力分布性状が異なり、骨組解析では算定されず、立体 FEM 解析等を行って照査する必要がある。本研究では、図-3(a)に示すようなフランジタイプおよび、ここでは、圧縮斜材から引張斜材への軸力の伝達に鋼製部材を用いず、コンクリートで伝達する図-3(b)に示すような埋込みタイプに関して、3次元 FEM 解析を行い、応力性状の違いを明らかにするものである。この埋込みタイプは、鋼管端部にフランジを設け、かつ鋼管に作用する軸力をコンクリート床版に伝達できる構造として解析を行った。また、鋼管の形状としては角形と丸形の形状が考えられるが、本研究においては、一般に疲労耐久性が勝ると言われている丸形鋼管を対象とした。

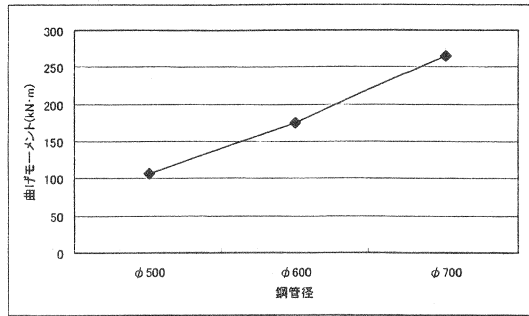


図-2 発生曲げモーメント

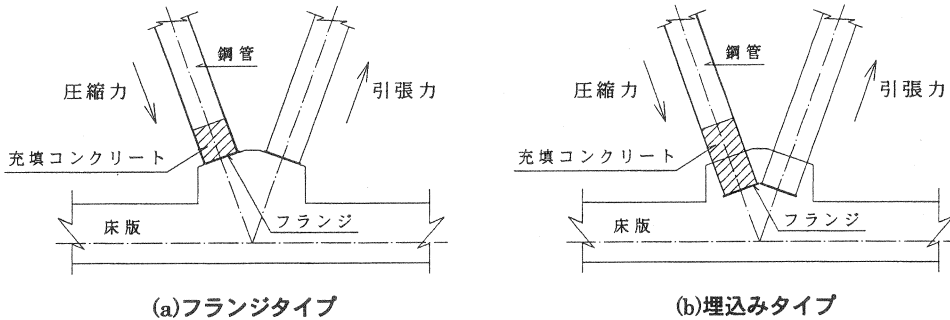


図-3 検討対象とした格点構造

3. 弾性 FEM 解析

3.1 弾性 FEM 解析モデル

弾性 FEM 解析を行った検討モデルを表-1、材料定数を表-2 に示す。

表-1 検討モデル (弾性)

	記号	フランジ厚 (mm)	充填コンクリート高さ (mm)	鋼管		荷重ケース		備考
				径 (mm)	板厚 (mm)	軸力	曲げモーメント	
フランジタイプ	Lf16-0	16	0	500	12	○	○	
	Lf40-0	40	0			○	○	
	Lf16-250	16	250			○	○	
	Lf16-500	16	500			○	○	
埋込みタイプ	Le16-0	16	0	500	12	○	○	
	Le16-500	16	500			○	○	
	Le16-500e	16	500			○	○	床版端部弾性ゴム使用

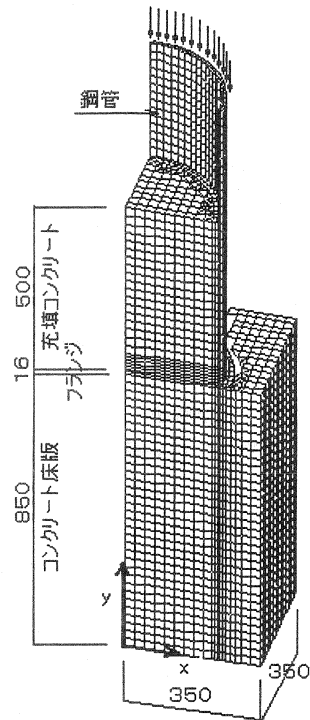
(注) ○印のみ検討した荷重ケース

弾性 FEM 解析では、軸力および曲げモーメントに対して検討を行った。軸力に対する検討においては、対称条件を設定し4分の1モデルとしている。また、曲げモーメントに対する検討においては、同様に対称条件を設定し2分の1モデルとしている。全モデルともコンクリート床版厚さは850mmとし、鋼管からの縁端距離を100mmとした。また、鋼管径は500mmで鋼管厚は12mmとした。表-1に示す荷

表-2 使用材料

	使用材料	弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比
コンクリート	40N/mm ²	3.1×10 ⁴	0.167
鉄筋	SD345	2.0×10 ⁵	0.300
鋼管	SM490	2.0×10 ⁵	0.300
弾性ゴム	天然ゴム	5	0.490

重ケースの項目における軸力あるいは曲げモーメントに丸をつけたものが検討したモデルである。また、床版端部に弾性ゴムを使用したものは、埋込みタイプの場合、床版と鋼管が接触する端部において応力が集中するため、これを緩和させる目的で使用したものである。弾性解析においては、コンクリートと鋼材との接触面における全ての接点で完全な付着があるものとして解析を行っており、付着力に関するバネ等は考慮していない。荷重は、 $\phi 500\text{mm}$ の全面積に 10N/mm^2 が作用するような軸力 (以降、基準軸力と呼ぶ) および $\phi 500\text{mm}$ の端部に平面保持が成り立つ場合 10N/mm^2 の応力度が発生するような曲げモーメントとし、鋼管自由端部に一様に載荷している。図・4に FEM 解析を行ったモデルの一例として、Lf16-500 の軸力のみを作用させたケースにおける FEM 解析モデル (1/4モデル) を示す。ここでは、鋼管、フランジ、コンクリート床版全ての部材を 8 節点ソリッド要素を用いてモデル化した。なお、コンクリート床版下端は全方向とも拘束した。

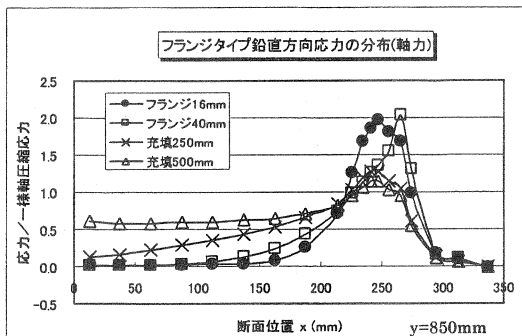


図・4 FEM 解析モデル (1/4モデル)

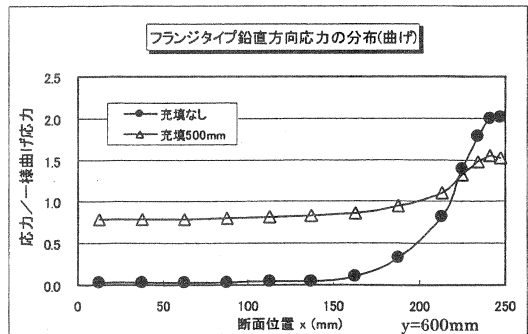
3. 2 弾性 FEM 解析結果

軸力を作用させた場合のフランジタイプにおける鉛直方向応力度を平均軸圧縮応力で除した値を縦軸に、断面位置を横軸にプロットしたものを図・5に示す。ここでの断面位置とは鋼管中心位置を 0mm とし、 250mm の位置を鋼管外縁とする。図・5から、鉛直方向応力は鋼管取り付け部付近に集中しており、鋼管の中央部にはほとんど応力が発生しない結果となった。また、今回行った FEM 解析

では、フランジを厚くしてもあまり改善効果はなく、この集中した応力に対して検討する必要がある。また、コンクリートを充填する場合は、かなり応力の集中は低減される。充填高さに関しては、 $\phi 500\text{mm}$ の鋼管の場合、鋼管径程度行えば、充填コンクリート部ではほぼ均一に応力が伝達される。また、曲げモーメントを作用させた場合のフランジタイプにおける鉛直方向応力度を平面保持が成り立つものとして算出した鉛直方向応力度で除した値を縦軸に、断面位置を横軸にプロットしたものを図・6に示す。図・6に示すように曲げモーメントに関しても軸力が作用する場合と同じ結果となった。一方、埋め込みタイプの場合、図・7に示すようにフランジ部に発生する鉛直方向応力は小さくなるが、コンクリート床版と鋼管との界面に大きな圧縮応力が発生する。これを低減させるために、床版表面に弾性ゴムを敷設した場合、図・8に示すように応力の分布性状は床版下方に平行にシフトするだけで、応力度の大きさはほとんど変わらない結果となった。



図・5 フランジタイプ鉛直方向応力 (軸力)



図・6 フランジタイプ鉛直方向応力 (曲げ)

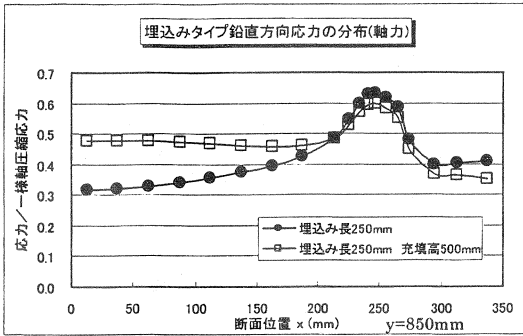


図-7 埋込みタイプ鉛直方向応力 (軸力)

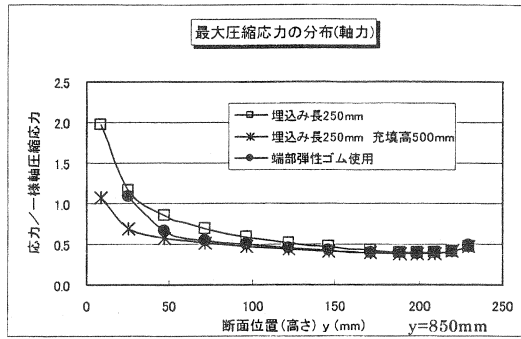


図-8 最大圧縮応力

4. 非線形FEM解析

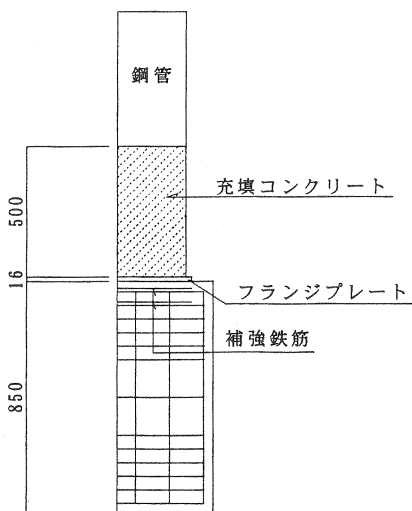
4.1 非線形FEM解析モデル

非線形解析を行ったモデルを表-3に示す。充填コンクリートのないフランジタイプを基本モデルとし、充填コンクリート高さを500mmとしたモデルおよび、表面に発生する鉛直方向応力がフランジタイプと比べ小さい埋込みタイプのもを比較した。

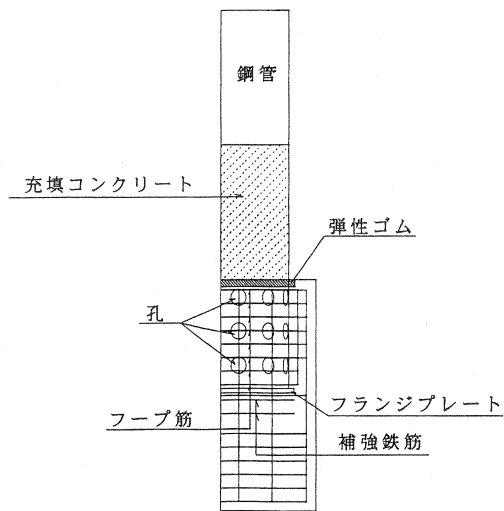
表-3 検討モデル (非線形)

	記号	フランジ厚 (mm)	充填コンクリート高さ(mm)	備考
フランジタイプ	Nf16-0	16	0	
	Nf16-500	16	500	
埋込みタイプ	Ne16-500e	16	500	床版端部弾性ゴム使用

フランジタイプは、フランジとコンクリート床版との接点は完全付着として解析を行った。また、充填コンクリートは弾性材料として取り扱い、床版コンクリートは引張強度を2.5N/mm²とし、コンクリート床版に対して側圧は考慮せずに解析を行っている。また、床版内部には鉄筋を配置し、フランジ下面には5cm角でメッシュ筋を配置している。充填コンクリートがある場合のフランジタイプの構造を図-8(a)に示す。一方、埋込みタイプとしては、種々のタイプが提案されているが、ここでは、図-8に示すように鋼管から直接床版に応力を伝達する孔あき鋼板ジベルを用い、フランジタイプと同様の条件で解析を行った。



(a) フランジタイプ



(b) 埋込みタイプ

図-8 解析モデル

埋込みタイプでは鋼管とコンクリート床版部との付着力によって性状が異なる可能性があるため、この界面においてはコンクリートの付着力を圧縮強度の 1/100 とした非線形バネを用いた⁵⁾。また、孔あき鋼板ジベルとコンクリート床版との界面においては、鉛直軸方向に文献より算出した非線形バネを考慮し⁶⁾水平軸に関しては2方向ともタイピングしている。設定したせん断バネ定数を図-9に示す。なお、今回の解析では孔あき鋼板はソリッド要素でモデル化しているため、このモデル化した孔あき鋼板のせん断バネ定数との和が図-9のせん断バネ定数になるように設定している。鉄筋に関してはフランジタイプと同様な配置とし、さらに鋼管埋め込み部には拘束鉄筋としてフープ筋を配置している。また、鋼管とコンクリート床版との界面の端部には弾性ゴムを考慮している。

作用荷重に関しては、両タイプとも軸力のみとし、基準軸力までを5ステップに分割し荷重を増分した。また、基準軸力レベル以降は、平均応力で 0.2N/mm^2 ずつ基準軸力の 1.7 倍まで荷重を増分した。荷重は、鋼管の自由端部に等分布荷重として載荷している。解析モデルは、対称条件を設定し4分の1モデルとした。なお、コンクリート床版は tension cut-off を考慮した Drucker-Prager の破壊基準を用い、鋼管および鉄筋は von-Mises の破壊基準を用いて解析を行っている。鋼管の応力-ひずみ関係および、鉄筋の応力-ひずみ関係はそれぞれ図-10および図-11に示すようにバイリニアモデルで評価している。また、total-lagrange 法により幾何学的非線形性も考慮している。

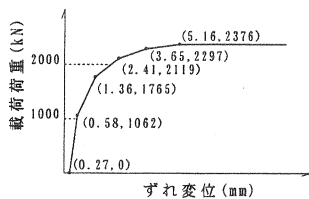


図-9 せん断バネ定数

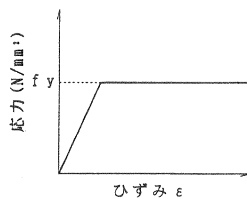


図-10 鋼管応力ひずみ曲線

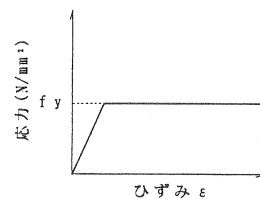


図-11 鉄筋応力ひずみ曲線

4.2 非線形 FEM 解析結果

基準軸力作用時における、フランジタイプに関する非線形解析結果を図-12および図-13に示す。図-12および13はコンクリート床版上面のひび割れ図である。フランジタイプで充填コンクリートがない場合、フランジ外側に円周状に多数のひび割れが発生している。しかし、コンクリートを充填した場合、このひび割れの数が少なくまたひび割れ幅も小さくなる。ただし、今回の解析ではフランジとコンクリート床版との接点は完全付着としているが、この点が滑ってフランジとコンクリート床版がずれた場合、両モデルともフランジ外縁部付近に発生しているひび割れの数が少なくなり、かつひび割れ幅が小さく可能性がある。一方、弾性ゴムを取り付けた埋込みタイプの場合、コンクリート床版表面に発生するひび割れは、基準軸力作用時では発生しない結果となった。

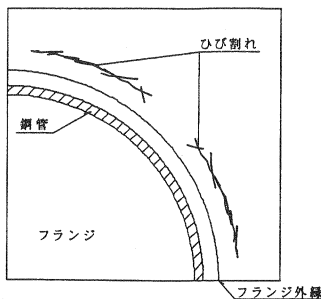


図-12 フランジタイプ(充填コンクリートなし)

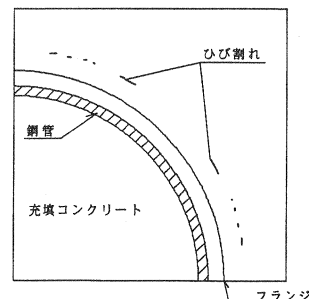


図-13 フランジタイプ(充填コンクリート 500mm)

基準軸力の 1.7 倍の荷重を載荷した場合の充填コンクリートがないフランジタイプの最大圧縮応力図を図-14に示す。図-14はコンクリート床版上面であるが、最大で 57N/mm^2 程度の圧縮応力が発生している。しかし、圧縮破壊には至っていない。この結果から、充填コンクリートがない場合のフランジタイプであっても、使用時においてはひび割れの発生があるが、耐荷力は有していると考えられる。また、他の2ケースにおいても基準軸力の 1.7 倍の荷重を載荷しても圧縮破壊には至らなかった。

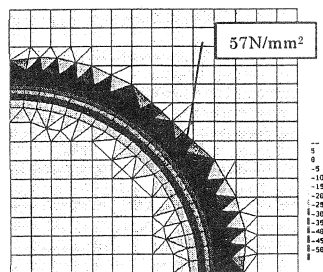


図-14 最大圧縮応力図 ($y=850\text{mm}$)

ただし、今回の解析では、フランジとコンクリート床版の接点は完全付着としているので、接点付近ではフランジによってコンクリートを拘束することになり、耐荷力が増加することになる。したがって、今後、すべりを考慮して解析する必要がある。また、複合トラス橋の格点構造として斜材から床版に作用する力だけでなく、弦材から作用する力も考慮しなければ使用荷重時における性能あるいは耐荷力は評価できない。したがって、この点に関しては今後検討する必要がある。

5. おわりに

本研究において、以下のことが明らかとなった。

- ①フランジタイプでコンクリートを充填しない場合、フランジと鋼管の接合部付近に応力が集中する。これはフランジを厚くしても改善効果は少ないため、設計においては、この応力集中を考慮する必要がある。
- ②埋め込みタイプの場合、鋼管とコンクリート床版との界面において大きな圧縮応力が発生する可能性があるため、これを考慮し設計することが必要となる。
- ③フランジタイプの場合、コンクリートを充填した場合としない場合とでは、ひび割れの発生が大きく異なり、弾性ゴム使用の埋め込みタイプは表面ひび割れの発生を抑えることができる。ただし、埋め込みタイプの場合は、界面から水分が流入しやすいため適切な防水対策が必要となると思われる。
- ④非線形解析を行った3タイプとも基準軸力の 1.7 倍まで圧縮破壊には至らなかった。したがって、3タイプとも圧縮軸力に対しては十分な耐荷力を有していると考えられる。ただし、今後、鋼とコンクリートのすべりを考慮して解析する必要がある。

参考文献

- 1)辻村隆、室井進次、野呂直以、二井谷教：複合トラス構造格点部の試験、第10回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、pp65～68、2000.10
- 2)本間敦史、黒岩正、日紫喜剛啓、古市耕輔：複合トラス構造接合部の耐力確認実験、第8回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、pp59～64、1998.10
- 3)江口信三、二井谷教治、正司明夫、二階堂輝幸：鋼トラスウエブP C橋格点部の試験、第8回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、pp49～52、1998.10
- 4)Bernard,C et al : Les viaducs du Boulonnais sur Une procédure de réalisation, Travaux n° 736 novembre 1997
- 5)松本貴宏、小玉乃理子、依田照彦：FEM解析を用いた孔あき鋼板ジベルのせん断特性に関する研究、第55回年次学術講演会講演概要集、1-A260、pp、2000.
- 6)松本正之、小林寛、正司明夫、栗田章光：波形鋼板ウエブP C橋(中野高架橋)ー波形鋼板と床版接合部のせん断実験ー、第10回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、pp871～874、2000.10